

Einsatz der Mikroelektronik in der Meß- und Regelungstechnik

Leonhard, Werner

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 34, 1982,
S.157-171



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Einsatz der Mikroelektronik in der Meß- und Regelungstechnik*)

Von **Werner Leonhard**, Braunschweig

(Eingegangen am 28.9.1982)

Einleitung

Die Entwicklung der Halbleitertechnik, die 1948 mit der Erfindung des Transistors einen ersten aufsehenerregenden Erfolg verzeichnete, hat seither eine unüberschaubare Vielfalt neuartiger elektronischer Bauelemente mit ständig verbesserten Eigenschaften hervorgebracht. Sie hat damit dem technischen Fortschritt, z.B. durch die Einführung der Computertechnik, umfassende Möglichkeiten eröffnet und die Basis für neue Gebiete der Wissenschaft und bedeutende Industriezweige geschaffen.

Seit etwa 15 Jahren besteht – anfangs durch die Anforderungen der Raumfahrt bedingt, inzwischen aber aus eigenem Antrieb – eine starke Tendenz zur Miniaturisierung elektronischer Bausteine in Form der sogenannten integrierten Schaltungen. Die Massierung elektronischer Schaltungen auf kleinstem Raum hatte eine unvorstellbare Steigerung der Signalverarbeitungskapazität je Volumeneinheit zur Folge; dies geht einher mit einer durch automatische Fertigung ermöglichten dramatischen Senkung der Herstellungskosten. Diese Entwicklung hat inzwischen auch außerhalb der technischen Fachwelt große Aufmerksamkeit erregt; angesichts der denkbaren Rückwirkungen auf das Arbeitsplatzangebot hat sich daraus eine lebhaftere öffentliche Diskussion über Vor- und Nachteile der Mikroelektronik ergeben.

Im folgenden soll am Beispiel der Meß- und Regelungstechnik gezeigt werden, welche Spuren die Mikroelektronik und insbesondere der Mikroprozessor, das universellste Bauelement der Mikroelektronik, auf einem Teilgebiet der Technik hinterläßt. Alle Anzeichen deuten darauf hin, daß dieses Gebiet von der Mikroelektronik künftig entscheidend geprägt werden wird.

1. Was ist ein Mikroprozessor?

Es handelt sich dabei um einen miniaturisierten Halbleiterbaustein, der heute bis zu etwa 50.000 Schalttransistoren auf einem Silizium-Einkristallplättchen von etwa 5×5 mm Größe enthalten kann. Die Schaltung, deren Einzelmaße im μm -Bereich liegen, ist von außen durch 20–60 Anschlüsse zugänglich. Das besondere an einem

*) Überarbeitete Fassung eines Vortrages, der am 9.1.1981 in der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten wurde.

Mikroprozessor, im Gegensatz zu einer normalen integrierten Schaltung, besteht darin, daß die Funktion durch die inneren elektrischen Verbindungen nur im Prinzip festgelegt ist, während die speziellen Eigenschaften vom Anwender durch ein veränderliches Programm bestimmt werden, das sich in einem ebenfalls integrierten Mikropeicher befindet. Man hat somit eine zunächst funktionsneutrale Schaltung, die in einer kostengünstigen automatischen Massenfertigung hergestellt werden kann. Erst über das Programm ergibt sich daraus eine unendliche Vielfalt von verschiedenen Anwenderfunktionen.

Man prognostiziert in dem für die Halbleitertechnik charakteristischen Optimismus in einigen Jahren bis zu 1 Million Transistoren auf einem Plättchen, womit man freilich immer noch weit von der biologischen Packungsdichte entfernt wäre. Gleichzeitig soll sich die Schaltgeschwindigkeit, die von den Abmessungen abhängt, noch wesentlich erhöhen; bei den heute verwendeten Prozessoren liegt die durch einen Quarzoszillator erzeugte Taktfrequenz zwischen 2 und 10 MHz.

Die Prozessoren werden mit Speicher- und Ein-/Ausgabe-Bausteinen zu vollständigen Mikrorechnern vereinigt (Bild 1), wobei die Leistungsfähigkeit einer postkartengroßen Leiterplatte der von ganzen Einschüben und Geräteschränken früherer Bauart entspricht. Der Aufwand liegt unter $1/100$ der Kosten für einen leistungsmäßig vergleichbaren Prozeßrechner vor wenigen Jahren.

Mikroprozessor

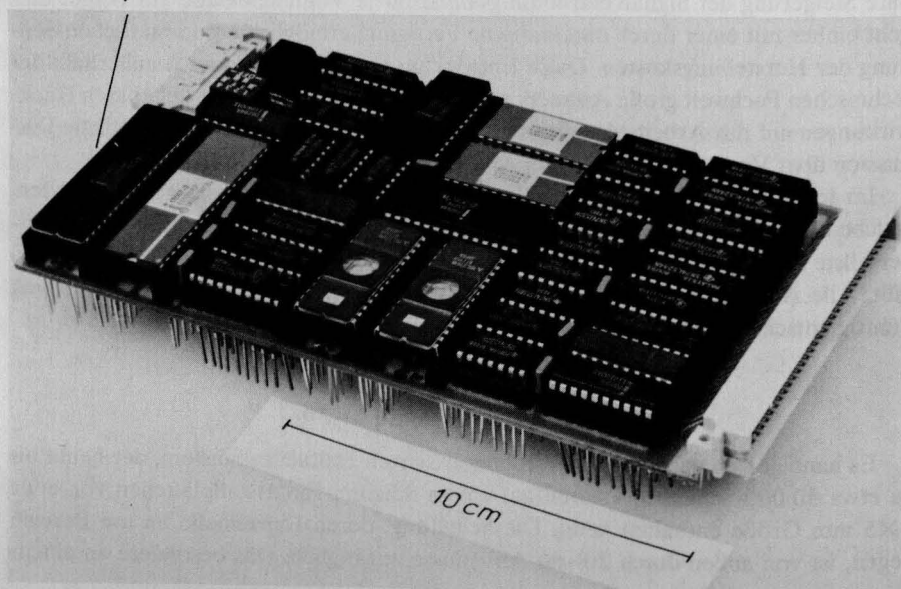


Bild 1

*Mikrorechner (Eigenentwicklung des Instituts für Regelungstechnik)
mit Mikroprozessor INTEL 8086 und 16 kByte Speicher*

Die Kombination

- Flexibilität eines programmgesteuerten Rechners,
- Störungsempfindlichkeit der digitalen Signalverarbeitung,
- Niedrige Gerätekosten

ist die Ursache, daß Mikrorechner in viele Gebiete der Meß-, Nachrichten- und Regelungstechnik eindringen; diese Entwicklung hat sich in den letzten Jahren lawinenartig verstärkt, was Folgen für die Technik und auch für die Arbeitswelt nach sich zieht. Da die Umstellungen schneller vor sich gehen, als dies der bisherigen durch den normalen Generationswechsel bewältigten Evolution in der Technik entspricht, sind bei manchen Unruhe und Zukunftsängste entstanden. Hierauf werde ich zum Schluß noch kurz eingehen.

2. Wofür sind Mikrorechner verwendbar?

In der Meßtechnik, Nachrichten- und Regelungstechnik werden elektrische Signale (oder Meßwerte, die in elektrische Form umgewandelt wurden) in vielfältiger Weise verarbeitet. Man versteht darunter Verknüpfungen, die mathematisch durch lineare oder nichtlineare algebraische Beziehungen oder Differentialgleichungen beschrieben werden, z.B. Integration, Differentiation, Filterung, Modulation, Multiplikation usw. Die meisten dieser Operationen werden heute mit analogen Mitteln und kontinuierlich ausgeführt. Zwar ist seit langem bekannt, daß digitale Verfahren den Vorteil größerer Störsicherheit haben, da nur noch binäre (d.h. zweiwertige) Signale vorkommen, doch waren sie bisher mit dem Nachteil eines hohen gerätetechnischen Aufwands belastet; seitdem mikroelektronische Bauteile zur Verfügung stehen, entfällt dieses Hindernis. Es ist sogar zu erwarten, daß digitale Verfahren künftig in vielen Fällen kostengünstiger zu verwirklichen sind als analoge, da keine Maßnahmen zum Abgleich umgebungsbedingter Driteffekte mehr notwendig sind und die programmtechnische Funktionsbeschreibung ungleich flexibler ist als eine schaltungstechnische Festlegung. Die bisher vorhandene „Eingangsschwelle“ für den Einsatz digitaler Verfahren wird dadurch wesentlich gesenkt.

Damit zeichnet sich als ein allgemeines Verarbeitungsprinzip ab, Meßwerte und Signale aller Art entweder unmittelbar digital zu erzeugen (was bei Längen, Geschwindigkeiten oder Zeitmessungen besonders einfach ist) oder an Ort und Stelle aus der analogen in digitale Form zu bringen und digital weiter zu verarbeiten (Bild 2).

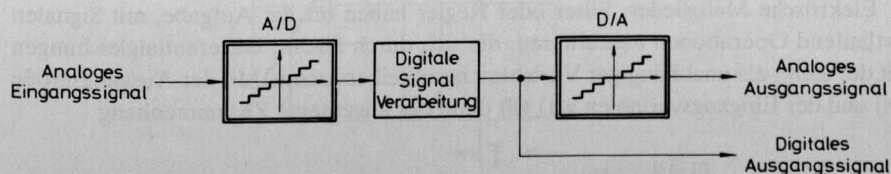


Bild 2
Digitale Signalverarbeitung

Anschließend wird wieder ein analoges Ausgangssignal erzeugt, z.B. bei der Sprachübertragung, doch kann die Ausgangsgröße auch digital genutzt werden, etwa um einen Stromrichter als Leistungsstellglied zu steuern.

Wegen der geringfügigen Gerätekosten der Mikrorechner ergibt sich so eine ausgeprägte Dezentralisierung der digitalen Signal- und Datenverarbeitung; die Mikrorechner lassen sich nun in den Endgeräten unterbringen, was deren Vielseitigkeit verbessert und den externen Datenfluß durch Kompression reduziert. Die damit wirtschaftlich praktikabel gewordene Autonomisierung von Teilfunktionen erleichtert z.B. die Automatisierung von veränderlichen Fertigungsvorgängen mit Hilfe von Industrierobotern ohne mechanische Umrüstung.

Die bei einem zentralen Prozeßrechner aus Aufwandsgründen unvermeidliche Engpaßwirkung entfällt bei der Dezentralisierung, so daß insgesamt ein günstigeres Verhalten im Störfall zu erwarten ist; bei sicherheitstechnisch wichtigen Anwendungen, etwa im Verkehrsbereich oder bei Kraftwerken, wird der notwendige mehrkanalige (redundante) Aufbau von Steuerungsfunktionen wirtschaftlich vertretbar. Hinzu kommt, daß mikroelektronische Komponenten keinem Verschleiß unterliegen und wegen der Einbettung der aktiven Schaltelemente in das Silizium-Trägermaterial, der stark verringerten Zahl äußerer Kontakte und Verbindungen sowie der winzigen Angriffsfläche für Störfelder äußerst zuverlässig sind. Sie sind allerdings auch nicht reparierbar; vielmehr müssen im Störfall Bausteine oder ganze Karten ausgetauscht werden. Es ist jedoch zu erwarten, daß mit der Weiterentwicklung der Mikroelektronik hochentwickelte Diagnoseprogramme verfügbar werden, um die Fehlersuche zu erleichtern. Damit eröffnen sich auch Perspektiven, durch Selbstdiagnose ein gewisses Maß an Fehlertoleranz zu erreichen, was wegen des Aufwandes heute nur in sehr geringem Umfang der Fall ist.

Bei regelungstechnischen Anwendungen wird es möglich werden, die Regler adaptiv zu gestalten, um sie in die Lage zu versetzen, sich selbsttätig an das zu regelnde System anzupassen, wenn sich dessen dynamische Eigenschaften verändern. Als Beispiel könnte man einen mehrachsigen Roboter anführen, bei dem sich infolge der variablen Geometrie die Kopplungen zwischen den Achsen und die wirksamen Trägheitsmomente und Steifigkeiten verändern.

3. Kontinuierliche und diskrete Signalverarbeitung

Elektrische Meßglieder, Filter oder Regler haben oft die Aufgabe, mit Signalen fortlaufend Operationen auszuführen, die sich durch lineare Differentialgleichungen mit der Zeit t als unabhängiger Variable τ beschreiben lassen. Mit der Ausgangsgröße $x(t)$ und der Eingangsvariablen $y(t)$ gilt dann der allgemeine Zusammenhang

$$\sum_0^n a_\mu \frac{d^\mu x}{dt^\mu} = \sum_0^{m \leq n} b_\mu \frac{d^\mu y}{dt^\mu}, \quad (1)$$

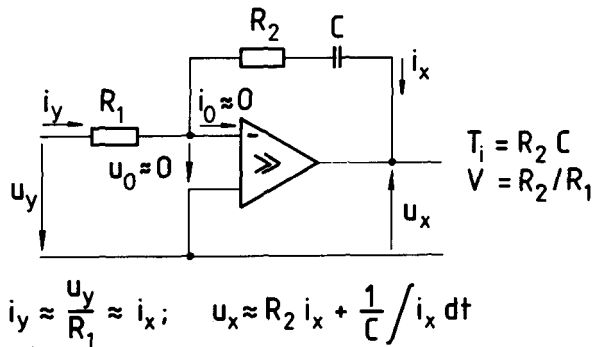
wobei als Beispiel die Gleichung eines einfachen Bandfilters

$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2x}{dt^2} + 2D \frac{1}{\omega_0} \frac{dx}{dt} + x = V y(t) \quad (2)$$

oder eines PI-Reglers

$$T_i \frac{dx}{dt} = V \left[T_i \frac{dy}{dt} + y \right] \quad (3)$$

gelten kann. Bei der analogen Signalverarbeitung werden die Variablen durch analoge elektrische Spannungen und Ströme abgebildet; hierzu verwendet man elektrische Schaltungen unter Einschluß aktiver Elemente, sogenannter Rechenverstärker, deren Verhalten durch die abzubildende Differentialgleichung beschrieben wird. Bild 3 zeigt als Beispiel die zu Gl. (3) gehörige Verstärkerschaltung.



$$i_y \approx \frac{u_y}{R_1} \approx i_x; \quad u_x \approx R_2 i_x + \frac{1}{C} \int i_x dt$$

Bild 3
Analoge Filterschaltung (PI-Glied)

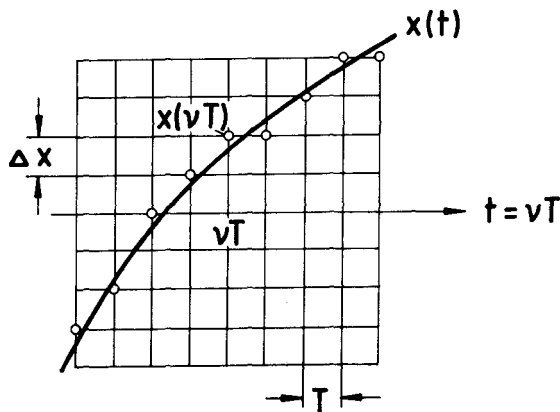


Bild 4
Amplituden- und Zeit-Diskretisierung

Im Gegensatz zur analogen setzt die digitale Signalverarbeitung eine Diskretisierung der Variablen bezüglich Amplitude und Zeit voraus, wie dies in Bild 4 angedeutet ist. Die Funktionen x, y werden also durch Punktfolgen ersetzt, die auf den Kreuzungspunkten des Rasters liegen. Bei einer zeitgebundenen Signalverarbeitung kommt jeder diskrete Zeitpunkt $t = vT$ genau einmal vor; anstelle der unabhängigen Variablen Zeit kann aber natürlich auch eine beliebige andere diskretisierte Variable treten.

- a) Die durch die Amplituden-Diskretisierung entstehenden Rundungsfehler sind nichtlineare Effekte, sie lassen sich durch Wahl einer genügend großen Wortlänge unterdrücken: Mit k Dualstellen (k bit) kann ein ganzzahliger Wertebereich $0 \leq x \leq 2^k - 1$ digital abgebildet werden. Übliche Analog/Digital-Wandler arbeiten mit 10 bis 14 bit, entsprechend etwa 1.000 bis 16.000 verschiedenen Amplitudenwerten. Die Verarbeitung der digitalen Variablen in Mikrorechnern erfolgt, je nach der erforderlichen Genauigkeit, mit 8, 16 oder 32 bit.
- b) Die Zeitdiskretisierung, d.h. die zeitliche Auflösung, ist durch die verwendete Abtastfrequenz $f_T = 1/T$ gegeben. Sie bestimmt die maximale Frequenz der digital übertragbaren und ohne prinzipielle Fehler analog wiedergewinnbaren Signale. Diese Grenze ist durch das Shannon-Theorem gegeben, wonach für eine Bandbreite f eine Abtastfrequenz von mindestens $2f$ notwendig ist.

Unter Berücksichtigung dieser Grenzen, wobei Wortlänge k und Abtastfrequenz f_T in gewissem Umfang austauschbar sind, läßt sich Gl. (1) in eine äquivalente Differenzengleichung umformen.

$$\sum_{\mu=0}^n c_{\mu} x(v+\mu) = \sum_{\mu=i}^{m \leq n} r_{\mu} y(v+\mu), \quad x(v) \equiv x(vT), \quad (4)$$

die mit $c_n = 1$ als Rekursion geschrieben wird,

$$x(v+n) = \sum_{\mu=i}^m r_{\mu} y(v+\mu) - \sum_{\mu=0}^{n-1} c_{\mu} x(v+\mu). \quad (5)$$

Diese Gleichung ist in „Echtzeit“, d.h. im Takt T , zu berechnen.

Mit diesem Verfahren sind alle bei einer analogen Signalverarbeitung möglichen Filterfunktionen ausführbar; die in Gl. (2, 3) genannten Beispiele lauten nun

$$x(v+2) = -c_1 x(v+1) - c_0 x(v) + r_0 y(v+2), \quad (6)$$

bzw.

$$x(v+1) = -c_0 x(v) + r_1 y(v+1) + r_0 y(v), \quad (7)$$

wobei die c_{μ}, r_{μ} geeignet zu bestimmen sind. Der Ausdruck

$$x(v+n) = \sum_0^n r_{\mu} y(v+\mu), \quad \text{d.h. für } c_0 = \dots c_{n-1} = 0, \quad (8)$$

entspricht einem gewichteten Mittelwert, wie er z.B. bei der diskreten Fouriertransformation vorkommt.

Ähnlich wie bei kontinuierlichen gibt es bei linearen diskreten Signalen und Übertragungen eine vollständige und abgeschlossene Systemtheorie. Sie umfaßt z.B. Stabilitätsbedingungen, Spektraldarstellung im Bildbereich. Faltungsalgorithmen und Beschreibung im Zustandsraum. Angesichts der Entwicklungen in der Mikroelektronik und der Optoelektronik, z.B. mit Glasfasertechnik, ist abzusehen, daß künftig ganze Übertragungssysteme (Telefon, Rundfunk, Fernsehen) digital arbeiten werden.

4. Einige Beispiele

4.1. Drehstrom-Meßwertverarbeitung

Als Beispiel einer digitalen Meßwertverarbeitung wird eine dreiphasige Wechselstrommessung betrachtet, wie sie in der elektrischen Energieversorgung in vielfältiger Weise vorkommt (Wirk- und Blindleistung, Leistungsfaktor, Impedanz, symmetrische Komponenten usw.). Hierfür verwendet man heute zwar meistens die gleichen primären Meßumformer (transformatorische Spannungs- und Stromwandler), jedoch schließen sich daran viele verschiedene elektromechanische oder elektronische Verarbeitungs- und Registriergeräte an.

Bei Einsatz eines Mikrorechners erhält man das in Bild 5 als Blockschaltbild gezeichnete Prinzip. Die drei Spannungen und Ströme werden dabei mit einem Vielfachen der Netzfrequenz, z.B. $N = 32$ mal je Periode, synchron abgetastet und nacheinander vom Analog/Digitalwandler verschlüsselt. Anschließend erfolgen mit den gespeicherten Meßwerten rekursive Operationen, z.B.

$$U_1^2(v) = \frac{1}{N} \sum_0^{N-1} u_1^2(v-\mu) = U_1^2(v-1) + \frac{1}{N} [u_1^2(v) - u_1^2(v-N)] \quad (9)$$

für den quadratischen Mittelwert der Strangspannung u_1 oder

$$P_1(v) = \frac{1}{N} \sum_0^{N-1} u_1(v-\mu) i_1(v-\mu) = P_1(v-1) + [u_1(v) i_1(v) - u_1(v-N) i_1(v-N)] \quad (10)$$

für die Wirkleistung im Strang 1; i_1 ist dabei der Strangstrom.

Diese abgeleiteten Größen $U_1^2(v)$, $P_1(v)$ usw. werden fortlaufend als Mittelwerte über die letzten N Meßwerte gebildet. Es hängt nur noch vom Programm, d.h. dem aufgesteckten Speicherbaustein, ab, welche Aufgabe der Mikrorechner in welchen Intervallen und ggf. mit welcher Priorität bearbeitet. Die gerätemäßige Ausführung des Rechners ist davon völlig unberührt.

Das Prinzip läßt sich auch auf den Netzschutz ausdehnen, um aus dem Verlauf von Strömen und Spannungen auf Typ und Ort von Störfällen zu schließen und, wenn

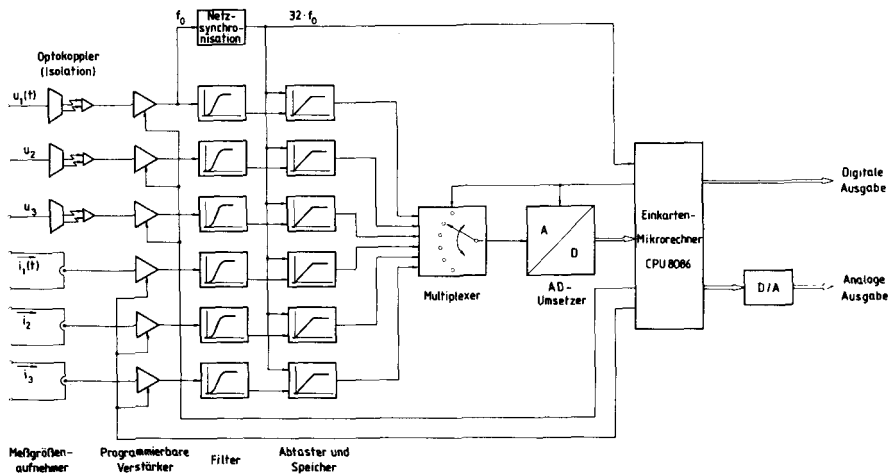


Bild 5
Drehstrom-Meßwerterfassung

möglich innerhalb einer Netzperiode, entsprechende Schalthandlungen einzuleiten. Die Meßgrößen sind auch für die Steuerung und Regelung des Netzes verwendbar.

Das Charakteristische an dieser Anwendung ist die dezentrale Vorverarbeitung der Signale an jeder Meßstelle, die es gestattet, das Zwischenergebnis als verdichtete Information störungsgeschützt (z.B. über eine Glasfaser) zur weiteren Auswertung zu übertragen.

4.2. Entkoppelte Regelung

Der Einsatz von Mikrorechnern als Regler eröffnet die Möglichkeit, nichtlineare oder verkoppelte Regelstrecken durch zusätzliche Rechenoperationen zu linearisieren oder zu entkoppeln. Ein einfaches Beispiel ist in Bild 6 a an einer Lageverstellung in Polarkoordinaten gezeigt, wie sie bei Handhabungsgeräten vorkommt. Die im Grundriß gezeigte Anordnung enthält eine Masse M , die durch zwei elektrische oder hydraulische Stellantriebe über eine Antriebskraft f_a in radialer und ein Antriebsdrehmoment m_a in rotatorischer Richtung bewegt werden kann.

Mit

$$v = \frac{dr}{dt} \text{ und } \omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (11)$$

gilt

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{M} f_a + r\omega^2, \quad (12)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{Mr^2} m_a - 2 \frac{\omega v}{r}. \quad (13)$$

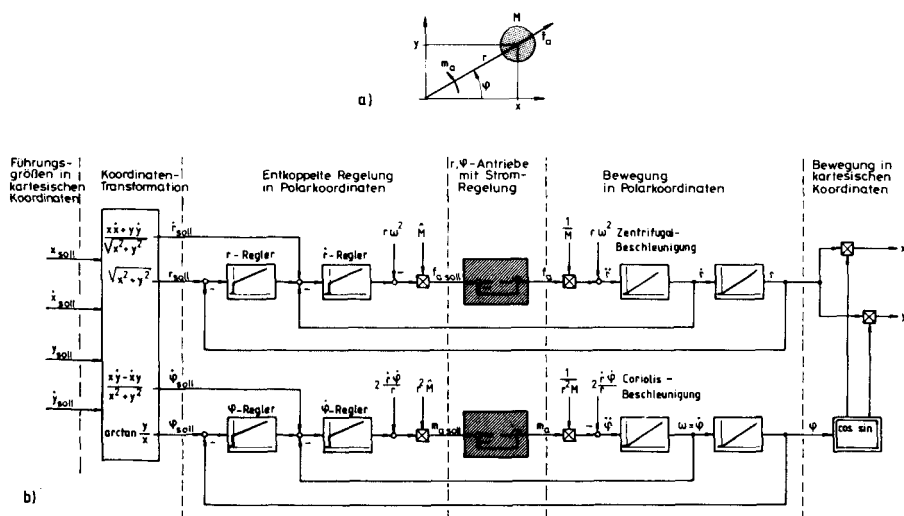


Bild 6

Stellantrieb in Polarkoordinaten mit entkoppelter Regelung in rechtwinkligen Koordinaten

Die beiden Bewegungen sind also über die Zentrifugal- und Coriolisbeschleunigung nichtlinear miteinander gekoppelt; in Bild 6b ist dies in graphischer Form anhand eines Blockschaltbildes gezeigt; dabei ist angenommen, daß die Stellantriebe mit einer schnellwirkenden elektrischen Kraftregelung ausgerüstet sind; typische Werte der dabei unvermeidlichen Verzögerung sind 1–5 ms. Wie im Bild gezeigt, lassen sich die in Gln. (12, 13) enthaltenen unerwünschten Kopplungen unter Verwendung von Meßgrößen für r, ω, v und eines Schätzwertes für M durch entsprechende Aufschaltungen auf der Sollwertseite angenähert kompensieren, so daß zwei entkoppelte Ersatzsysteme entstehen, deren Regelung keine Schwierigkeiten bereitet.

Als weitere Ergänzung ist in Bild 6b links eine Koordinatentransformation angedeutet, die es gestattet, die polaren Sollwerte $r_{\text{soll}}, \varphi_{\text{soll}}$ aus Vorgabewerten $x_{\text{soll}}, y_{\text{soll}}$ in einem kartesischen Koordinatensystem zu ermitteln; dabei ist zur genaueren Bahnführung noch eine Aufschaltung der Geschwindigkeits-Sollwerte vorgesehen. Bild 6 zeigt die außerordentliche Vielfalt der Aufgaben, die durch Einsatz von Mikrorechnern besser als bisher gelöst werden können. Die gesamte in Bild 6b enthaltene Signalverarbeitung kann von einem Mikrorechner in etwa 1 ms-Rhythmus abgewickelt werden. Ähnliche Probleme wie die gezeigte Entkopplung und Koordinatentransformation treten bei der Regelung von Drehstrommaschinen auf.

4.3. Elektrische Regelantriebe

Es gibt Schätzungen, wonach etwa 60% der gesamten in einem Industrieland erzeugten elektrischen Energie schließlich wieder in mechanische Arbeit umgewandelt werden. Dies geschieht durch elektrische Antriebe aller Art, wie man sie in der Indu-

strie, im Verkehr, Gewerbe und Haushalt mit den unterschiedlichsten Leistungen und Formen vorfindet. Die meisten elektrischen Antriebe bedürfen keiner Regelung, da sie mit etwa konstanter oder in einigen Stufen veränderbarer Drehzahl laufen sollen. Dagegen sind regelbare Antriebe immer dort erforderlich, wo eine genaue Anpassung der mechanischen Eingangsgrößen an die Last notwendig ist, also bei Aufzügen, Walzwerken, Fahrzeugprüfständen oder Werkzeugmaschinen usw.; von besonderer Bedeutung ist dabei, daß die meisten elektrischen Maschinen in allen Quadranten der Drehzahl-Drehmoment-Ebene arbeiten können und daß in den generatorischen Quadranten Energierückgewinnung möglich ist. Wegen des günstigen Wirkungsgrades orientiert sich die Leistungsaufnahme eines Regelantriebes fast ausschließlich an der Last, die Regelung des Antriebes leistet also einen Beitrag zur Energieeinsparung.

Als mechanische Regelgrößen kommen, je nach Art des Antriebes und Betriebszustand, wahlweise Drehmoment, Beschleunigung, Drehzahl oder Lage in Betracht, wie am Beispiel eines Aufzugsantriebes ohne weiteres deutlich wird. Die von manchen Antrieben geforderte Genauigkeit ist beachtlich; bei einer Papiermaschine kann ein Drehzahlfehler von weniger als 10^{-4} verlangt werden, bei einer Werkzeugmaschine ein Lagefehler von 10^{-5} m aus einem gesamten Verstellweg von 1 m.

Hochwertige Regelantriebe für solche Aufgaben sind heute überwiegend Gleichstromantriebe, bei denen die Stromwendung durch einen in die Maschine eingebauten mechanischen Kommutator erfolgt. Dieser verkörpert naturgemäß eine Schwachstelle, da er Leistung und Drehzahl von zu bauenden Maschinen begrenzt, Wartungsarbeiten erfordert und den freizügigen Einsatz der Maschinen in aggressiven oder explosiblen Atmosphären behindert.

Es hat in der Vergangenheit nicht an Versuchen gefehlt, den mechanischen Kommutator durch Übergang zu Drehstrommaschinen und ruhender Stromwendung zu vermeiden, doch haben sich dabei bisher unüberwindbare Hindernisse ergeben:

- Das Fehlen eines ruhenden, elektronisch steuerbaren Leistungsstellgliedes mit geringen Verlusten und zu tragbaren Kosten und
- die Tatsache, daß der Drehstrom-Asynchronmotor zwar eine unübertroffen einfache mechanische Konstruktion, aber eine äußerst verwickelte regelungsdynamische Struktur aufweist, die mit herkömmlichen Mitteln nicht in wirtschaftlicher Weise zu beherrschen war.

Erstaunlicherweise bietet die Halbleitertechnik nun für beide Probleme Lösungen an. Auf der Leistungsseite sind es Transistoren und Thyristoren, die als kompakte elektronische Schalter wirken und es gestatten, Stromrichter mit hohem Wirkungsgrad und praktisch beliebiger Leistung zu bauen. Auf der anderen Seite ist es die Mikroelektronik, bei der die Komplexität einer Regelung kein praktisches Problem mehr darstellt, da es programmtechnisch und nicht mehr schaltungstechnisch gelöst wird.

Durch Kombination dieser beiden Extreme, deren Leistungen sich um viele Größenordnungen unterscheiden, sind völlig neuartige technische Lösungen für elektrische Regelantriebe möglich geworden, die zu einem verstärkten Einsatz von stromrichtergespeisten Drehstrommaschinen führen werden.

Die Verwendung der Mikroelektronik zur Steuerung elektronischer Stellglieder hoher Leistung erfordert keine problematische Schnittstelle, da beide Elemente als Schalter, d. h. im Prinzip digital, arbeiten. Dadurch entsteht eine steuerungstechnisch homogene Wirkungskette von μW bis in den MW-Bereich; die auftretenden Verzugszeiten betragen nur wenige ms, was nahezu ideale Voraussetzungen für die Konstruktion von leistungsfähigen und dynamisch hochwertigen elektromechanischen Wandlern schafft, wie sie bei automatisierten Produktionsanlagen benötigt werden.

Das Gebiet stromrichter- und mikrorechner-geregelter elektrischer Antriebe ist von hoher Aktualität und Gegenstand eines starken internationalen Wettbewerbs. Hier ist von Interesse, daß bei uns nicht der mindeste Rückstand in Forschung und Industrie, auch nicht gegenüber den USA und Japan zu verzeichnen ist; eher ist das Gegenteil der Fall. Beispiele sind der $4 \times 1.4 \text{ MW}$ Drehstromantrieb der Versuchslokomotive 120 der Bundesbahn, die in gleicher Weise für Intercity- wie für Güterzugdienst geeignet ist, oder die neuartigen Drehstromantriebe für Walzwerke und Fördermaschinen, wie sie derzeit nur unsere Industrie liefert. Aber auch bei kleineren Antrieben, z. B. für Werkzeugmaschinen, ferner bei den von der Deutschen Forschungsgemeinschaft an den Hochschulen geförderten Arbeiten, findet sich ein beachtlicher Standard. So wurden auf der Interkama 1980 in Düsseldorf und der Hannover-Messe 1981 im Rahmen der Sonderschau „Angewandte Forschung“ vom Institut für Regelungstechnik entwickelte mikrorechner-geregelte 22 kW Drehstrom-Regelantriebe als „Weltpremiere“ vorgeführt.

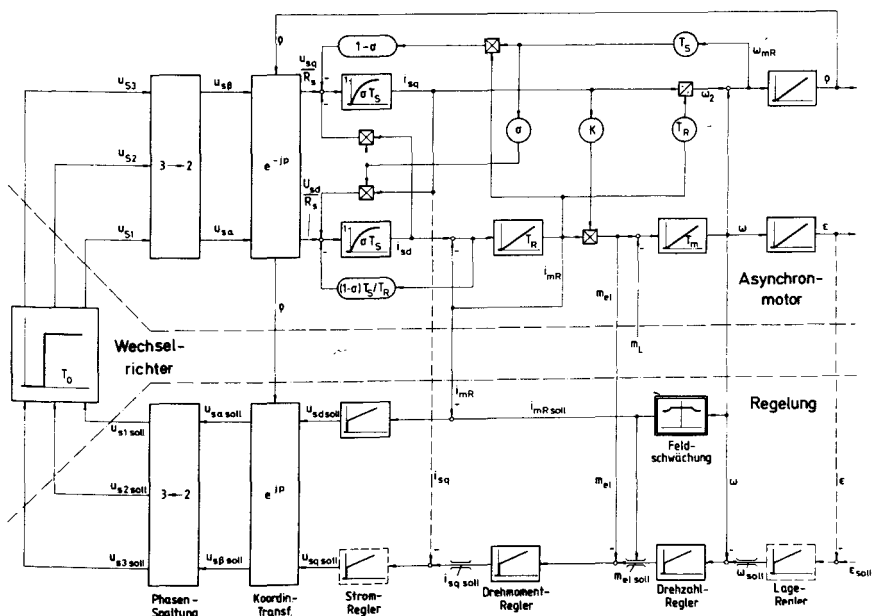


Bild 7

Regelungstechnisches Blockschaltbild eines mikrorechner-geregelten Drehstromantriebes

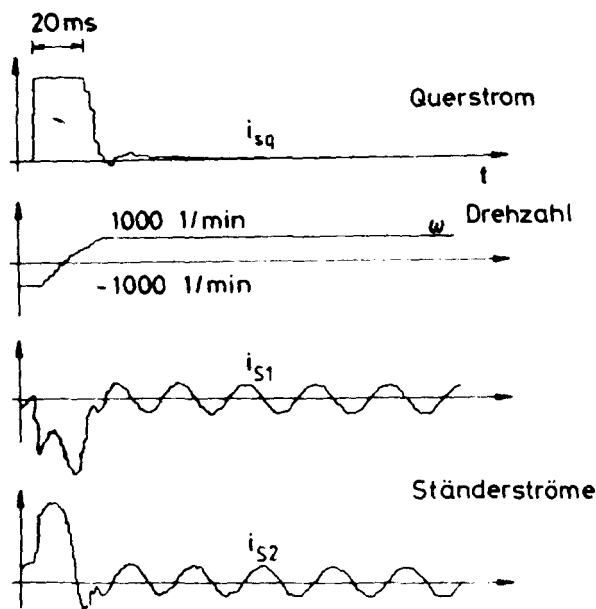


Bild 8
Regelvorgänge eines 1,5 kW Drehstrom-Stellantriebes

Bild 7 zeigt als Beispiel das Blockschaltbild eines Drehstrom-Regelantriebes; die mikrorechner-interne Signalverarbeitung erfolgt dabei in Feldkoordinaten, d. h. nach Transformation in ein mit dem magnetischen Drehfeld umlaufendes Koordinatensystem. In Bild 8 ist der Reversiervorgang eines 1,5 kW Drehstrom-Stellantriebes z. B. für eine Werkzeugmaschine dargestellt. Die geregelte Drehzahlumkehr des unbelasteten Motors zwischen ± 1000 1/min geschieht dabei in 25 ms. Der Antrieb hat, mit einer Lageregelung versehen, eine Winkelauflösung von 10^{-4} Umdrehungen; er läßt sich mit definiertem Drehmoment stetig bis zum Stillstand regeln.

4.4. Verteiltes Rechnersystem

Die meisten heute verwendeten Rechenanlagen verfügen über ein einziges Rechenwerk, das alle notwendigen Operationen sequentiell ausführt. Die Leistungsfähigkeit einer Anlage hängt deshalb in erster Linie von der Geschwindigkeit des Rechenwerkes mit dem zugehörigen Arbeitsspeicher ab. Hierfür werden in großem Umfang Mikroschaltkreise verwendet, nicht zuletzt da hohe Arbeitsgeschwindigkeit kleine Abmessungen voraussetzt.

Angesichts der geschilderten Fortschritte bei Mikroprozessoren liegt natürlich der Gedanke nahe, erhöhte Rechenleistung quantitativ, d. h. durch eine große Zahl parallel arbeitender Mikrorechner zu gewinnen. In der Vergangenheit gab es zahlreiche Versuche in dieser Richtung, doch sind sie bisher vorwiegend am Aufwand für die

einzelnen Rechenwerke und an den Schwierigkeiten ihrer Koordination gescheitert. Voraussetzung ist ja die Existenz eines wirkungsvollen Algorithmus, mit dem die einzelnen Rechenbausteine während möglichst langer Zeitabschnitte unabhängig voneinander arbeiten können; andernfalls würde der Gewinn an Rechenleistung durch die notwendige Verwaltungsarbeit wieder aufgezehrt. Die Entwicklung solcher Algorithmen hat bisher keine besondere Aufmerksamkeit erfahren; hier liegt noch ein weites Forschungsgebiet für die Informatik.

Es gibt Aufgaben, für die eine Parallelrechnung besonders geeignet erscheint; dazu gehören die Lösung partieller Differentialgleichungen, etwa die Berechnung eines Temperatur- oder Spannungsfeldes in einem Kontinuum oder die Simulation verteilter Systeme. Jeder Mikrorechnerbaustein kann dabei die Gleichungen eines Volumenelementes bearbeiten, indem er Daten nur mit den Nachbarelementen austauscht bzw. Randwerte aufnimmt.

Wesentlich ist natürlich, daß die Programmierung des verteilten Rechners in effektiver Weise erfolgt; dies kann mit einem Steuerrechner geschehen, der den Ablauf der Rechnung und den Datenaustausch organisiert; der Anteil der nichtparallelen Aktivität muß dabei auf ein Minimum beschränkt werden. Es gibt bereits Prototypen von Rechnern mit 128 oder 256 Rechenbausteinen, doch befindet sich dieses Forschungsgebiet noch in den Anfängen. Im Institut für Regelungstechnik wurden als Beispiel die Ausgleichsvorgänge in einem elektrischen Verbundnetz mit einem 16-Rechner-System untersucht. Es handelt sich dabei um eine Simulation mit sehr vielen Variablen; jeder Mikrorechner bearbeitet einen Netzknoten (Generator) mit 10–15 nicht-linearen Differentialgleichungen.

Mit den wenigen geschilderten Beispielen lassen sich die Möglichkeiten der Mikroelektronik in der Meß- und Regelungstechnik natürlich nur andeuten. Man hat geschätzt, daß es in der Technik mehr als 20.000 verschiedene Anwendungen für Mikrorechner gibt, von denen die meisten heute noch unbekannt sind.

5. Wie wirkt sich der verstärkte Einsatz der Mikroelektronik auf die Ingenieurstätigkeit aus?

Das Vordringen der Mikroelektronik beeinflußt naturgemäß die Ingenieurarbeit auf allen Stufen von der Forschung, Entwicklung, Projektierung und Fertigung über das Prüffeld bis zur Inbetriebnahme und Wartung der ausgelieferten Anlagen. Der Ersatz von Gerätetechnik durch Programmieretechnik („Software statt Hardware“) hat zur Folge, daß Laborarbeit durch Arbeit am Schreibtisch und Bildschirm abgelöst wird. Dies geht einher mit zunehmender Abstraktion in der Beschreibung physikalisch-technischer Abläufe. Es wird eine wichtige Aufgabe der Hochschule sein, trotz dieser unvermeidlichen „Algorithmisierung“ der gedanklichen Arbeit weiterhin das physikalische Verständnis zu betonen. Gute Programme kann ja nur entwickeln, wer die technischen Abläufe in einer mit Rechnern zu automatisierenden Anlage versteht. Gegenwärtig wird der Blick auf die physikalisch-technische Funktion durch die noch verwendeten vergleichsweise primitiven Programmierverfahren erschwert; dies wird

sich aber ändern, sobald Mikrorechner leistungsfähiger und Speicher noch billiger geworden sind, um höhere Programmiersprachen einzusetzen, wie dies bei größeren Rechenanlagen selbstverständlich ist.

Wie eingangs erwähnt, ist die Anwendung der Mikroelektronik in der Industrie wegen der daraus folgenden Gefahren für das Angebot an Arbeitsplätzen nicht unumstritten. Jedoch ist zu bedenken, daß ein Verzicht oder auch nur eine Beschränkung des Einsatzes eine völlige Abschottung unserer Wirtschaft vom Weltmarkt erfordern würde, was angesichts eines Exportanteils von 25 % des Sozialproduktes kaum vorstellbare Folgen hätte. Die Alternative ist deshalb nicht, ob man mehr Rationalisierung und Automatisierung durch Mikroelektronik will, sondern ob man ggf. bereit wäre, ganze Industriezweige, auf denen unsere gegenwärtige Lebensform beruht, aufzugeben. Nachdem die Mikroelektronik Realität geworden ist, bleibt uns nichts anderes übrig, als sie nach bestem Können zu nutzen. Angesichts des in den europäischen Industrieländern auch heute noch konzentriert vorhandenen Erfindungsreichtums und der bildungsmäßigen Infrastruktur halte ich die durch das Vordringen der Mikroelektronik entstehenden technischen Fragen für lösbar; aber auch die menschlichen Probleme, die durch eine Verschiebung der Qualifikationsmerkmale von Arbeitsplätzen und die daraus resultierende Verdrängung nicht anpassungsfähiger Mitarbeiter entstehen, erscheinen bei verständnisvoller Hilfsbereitschaft aller Beteiligten überwindbar.

Insgesamt erweist sich die Mikroelektronik als faszinierendes technisches Neuland, dessen künftige Bedeutung heute noch kaum abzuschätzen ist. Sie wird auf Jahre hinaus ein unerschöpfliches Potential für anspruchsvolle und, da fast materialfrei, umweltfreundliche technische Tätigkeit liefern. Für die Regelungstechnik bietet die Mikroelektronik ein ideales Medium zur Verwirklichung immer umfassenderer Steuerungssysteme.

Zusammenfassung

Durch die Einführung der Mikroelektronik, insbesondere der Mikroprozessoren, hat sich die technische Evolution deutlich beschleunigt. Die Auswirkungen werden sich nicht auf die unmittelbar betroffenen Gebiete wie Meß-, Regelungs- und Rechen-technik beschränken, sondern die Ingenieurtätigkeit insgesamt und die industriellen Arbeitsbedingungen verändern; auch Aspekte des Arbeitslebens sind betroffen. Die Hochschulen müssen sich in ihrem Ausbildungsangebot auf die neue Entwicklung, die als irreversibel anzusehen ist, einstellen.

Einige Literaturstellen

- [1] SCHREIBER, J.: Present State and development of microelectronics, ETG-Fachberichte, Bd. 11 (1982), S. 9.
- [2] HUGEL, J.: The present status and development tendencies in power electronics, ETG-Fachberichte, Bd. 11 (1982), S. 15.
- [3] YANG, A.H.; M. SIEDENTOP: Digitale Drehstrom-Meßeinheit, Regelungstechnische Praxis (1981), S. 197.

- [4] CLAUSSEN, U.: Adaptive zeitoptimale Lageregelung eines linearen Stellantriebes mit synchronem Linearmotor, Diss. TU Braunschweig (1979).
- [5] FREUND, E.; H. HOYER: Das Prinzip nichtlinearer Systementkopplung mit der Anwendung auf Industrieroboter, Regelungstechnik (1980), S. 80.
- [6] GABRIEL, R.; W. LEONHARD; C. NORDBY: Regelung der stromrichteragespeisten Drehstrom-Asynchronmaschine mit einem Mikrorechner, Regelungstechnik (1979), S. 379.
- [7] GABRIEL, R.: Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine mit einem Mikrorechner. Diss. TU Braunschweig (1982).
- [8] SCHUMACHER, W.: Microprocessor controlled AC-Servo drives, ETG-Fachberichte, Bd.11 (1982), S. 311.
- [9] FROMME, G.: Einsatz eines Mikrorechners als selbstoptimierender Regler für Strecken mit abschnittsweise konstanten Parametern, Regelungstechnik (1980), S.189.
- [10] WASCHATZ, U.: Adaptive control of electrical drives employing microprocessors, ETG-Fachberichte, Bd.11 (1982), S. 135.
- [11] SCHMIDT, K.: Einsatz eines Parallelrechners für die Untersuchung dynamischer Vorgänge in Energieversorgungsnetzen, Diss. TU Braunschweig (1982).